

А.И. РОГАЧЁВ, докт.техн.наук, **В.В. ГУРЬЕВ** (г.Харьков)

ОПТИМАЛЬНЫЕ УПРАВЛЕНИЯ МЕХАНИЗМАМИ РЕВЕРСИВНОГО СТАНА ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ

У статті розглянуто різноманітні критерії оптимальності для оптимізації роботи окремих механізмів стану гарячої прокатки металів. Наведені рекомендації по вибору критерію з точки зору його відповідності механізму та простоти реалізації.

The different optimal criterions for optimization of work separate mechanisms of metal hot rolling process is considered. The recommendations for choice criterion with point of view it accordance for mechanism and simplicity of realization is adduced.

Постановка задачи. Многие технологические процессы в металлургической промышленности носят периодический и прерывистый характер. К числу типичных процессов подобного рода относится горячая прокатка металлов на реверсивных обжимных станах – блюмингах и слябингах. Многочисленные механизмы таких прокатных станов – обжимные валки, нажимные устройства, рабочие и приёмные рольганги, станинные ролики, кантователи и манипуляторы – основную часть своего рабочего цикла находятся в неустановившемся состоянии, что определяется спецификой технологического процесса прокатки. Все перечисленные механизмы приводятся в действие электроприводами, обеспечивающими требуемые технологические режимы работы механизмов прокатного стана. В качестве последних чаще всего используют безредукторные электроприводы постоянного тока, выполненные по системе “управляемый выпрямитель – двигатель” (УВ-Д), в состав которой входит двигатель постоянного тока с независимым возбуждением и тиристорный или транзисторный преобразователь. Двигатели работают с высокой частотой пусков, торможений и реверсов, достигающей 1200 – 1500 включений в час.

Обеспечение высокой производительности современных блюмингов и слябингов требует расхода электроэнергии на тонну проката порядка 15–25 Квт-час, что при прокатке в 6 млн тонн в год составляет 90–150 млн Квт-час на один прокатный стан. Отсюда вытекает актуальная задача минимизации энергозатрат на осуществление технологического процесса горячей прокатки металла при сохранении производительности его работы или минимизация общего времени работы всего блюминга при сохранении или уменьшении потерь энергии.

Технологический процесс прокатки на блюминге начинается с подачи нагретого слитка стали на слитковоз, который транспортирует его к приёмному рольгангу. По этому рольгангу слиток продвигается к рабочей

клетки, где прокатывается за 11–19 проходов с обжатием в каждом из них на определённую величину, зависящую от массы слитка, типа стали и пр. В процессе прокатки слиток движется в разных направлениях по рабочим рольгангам, перемещается от калибра к калибру манипулятором и переворачивается по мере необходимости на 90° кантователем. При этом в зависимости от прохода верхний валок устанавливается на необходимом расстоянии от нижнего валка с помощью нажимного устройства. Все перечисленные механизмы блюминга приводятся в действие с помощью двигателей постоянного тока независимого возбуждения, включённых по схеме УВ-Д с тиристорными или транзисторными преобразователями.

Основным элементом блюминга является рабочая клеть с верхним и нижним обжимными валками. На долю главного привода этих валков приходится примерно половина всех расходов энергии. Работа двигателей, приводящих во вращение валки, характеризуется резкими толчками и большую часть времени они работают в переходном режиме. На рис.1 приведена диаграмма изменения числа оборотов обжимных валков в пределах одного прохода [1]. Эта диаграмма показывает, что изменение скорости вращения валков в течение каждого пропуска характеризуется трапецеидальным графиком. Далее в режиме холостого хода осуществляется реверс двигателя и процесс прокатки повторяется в обратном направлении. Таким образом, технологический процесс прохождения слитка через обжимные валки может быть представлен математической моделью электропривода постоянного тока при постоянном моменте нагрузки. При этом необходимо осуществлять разгон и торможение двигателя от начальной скорости ω_0 до конечной ω_k при постоянном статическом моменте, определяемом величиной обжатия слитка стали в валках, или выполнять реверс двигателя при постоянном моменте нагрузки холостого хода.

Для подачи слитка к валкам и приёма его после обжатия предназначены рабочие рольганги, которые приводятся во вращение одним или несколькими двигателями. При этом можно выделить три основные зоны работы рольганга – разгон рольганга с лежащим на нём раскатом от скорости $\omega = 0$ до скорости захвата слитка обжимными валками ω_c , вращение с постоянной скоростью ω_c и торможение рольганга до полной остановки. Затем процесс повторяется в обратном направлении. При заданной длине слитка усреднённая нагрузка на ролики рольганга остаётся постоянной, поэтому его работу в технологическом процессе также можно описать моделью электропривода, работающего в режиме отработки переходов по скорости при постоянном моменте нагрузки.

Нажимные устройства блюминга предназначены для перемещения верхнего обжимного валка на определённые расстояния по вертикали в соответствии с заданной программой прокатки. В каждом проходе

двигатель с помощью червячной передачи поднимает или опускает валок на требуемую величину, т.е. отрабатывает перемещение при нулевых значениях начальной и конечной скоростей вращения вала двигателя. Так как масса валка не изменяется, то моделью механизма нажимных устройств может служить модель позиционного электропривода при работе на постоянную нагрузку. Аналогичной моделью можно представить манипулятор, кантователь, поворотный стол и слитковоз.

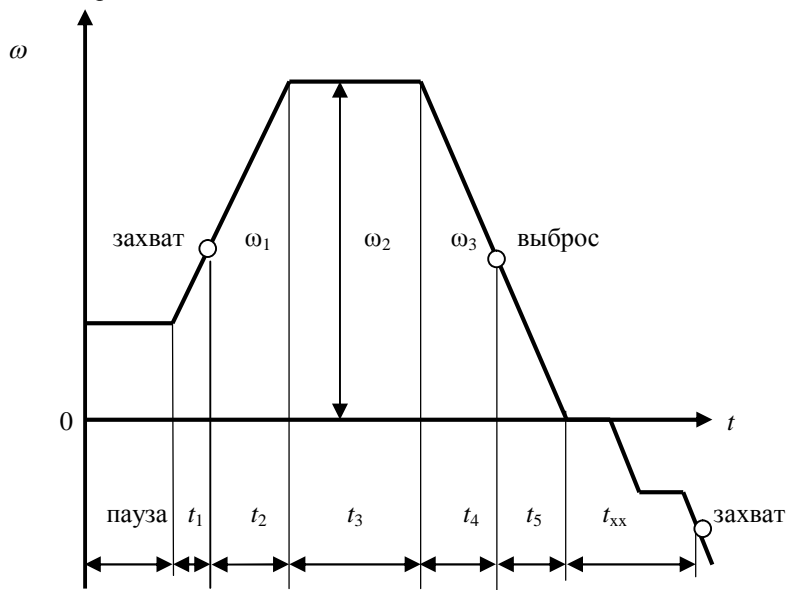


Рис. 1. Нагрузочная диаграмма главного двигателя блюминга, график изменения скорости вращения

Таким образом, перечисленные механизмы блюминга можно описать уравнениями динамики электропривода постоянного тока, работающего при постоянном моменте нагрузки или в режиме отработки переходов по скорости, как, например, обжимные валки, или в режиме отработки перемещений, как нажимные устройства по перемещению верхнего валка.

Цель данной работы заключается в выборе критерия оптимальности для каждого механизма блюминга и всего комплекса механизмов для получения максимальной производительности при минимальных потерях энергии.

Анализ динамических свойств промышленных управляемых выпрямителей с системой импульсно-фазового управления показывает, что для большинства электроприводов их инерционностью и незначительным

запаздыванием можно пренебречь. Кроме того, в настоящее время появились практически безынерционные силовые транзисторные элементы, допускающие напряжения до нескольких киловольт и токи до тысячи ампер, что дает возможность использовать их даже в электроприводах постоянного тока, близких к предельным по мощности. Поэтому при рассмотрении оптимальных процессов в электроприводах управляемый выпрямитель будем считать линейным безынерционным элементом, что позволяет в качестве объекта управления рассматривать только сам двигатель, который может быть описан системой из трёх линейных дифференциальных уравнений первого порядка

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\varphi}{d\tau} &= \omega \\ \frac{d\omega}{d\tau} &= \frac{1}{\beta_m} (i - m_n) \\ \frac{di}{d\tau} &= u - \omega - i \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где φ, ω, i, u, m – угол поворота вала, скорость вращения, ток якорной цепи, напряжение якорной цепи, момент нагрузки на валу двигателя соответственно, τ – текущее время. Все переменные даны в относительных единицах, а $\beta_m = T_m / T_y$, где T_m, T_y – электромеханическая и электромагнитная постоянные времени. Если выходной координатой является скорость вращения вала двигателя, то первое из уравнений (1) отпадает и общий порядок системы понижается на единицу.

Выбор критерия оптимальности. В зависимости от диаграммы рабочего цикла и от заданных условий прокатки для каждого из механизмов следует выбирать свой критерий. Например, время перемещения верхнего вала может существенно повлиять на общее время прокатки слитка, так как нажимные устройства работают в наиболее напряжённом режиме во времени. Для этих устройств в качестве критерия оптимизации целесообразно выбирать критерий оптимального быстрогодействия в виде

$$J_1 = T_{\min} = \int_0^T 1 \cdot d\tau. \quad (2)$$

Однако при этом необходимо учитывать ограничение на допустимый уровень потерь электроэнергии, который для крупных двигателей определяется, в основном, среднеквадратичными токовыми потерями

$$q = \int_0^T i^2(\tau) d\tau.$$

Если у какого-то из механизмов время переходного процесса допустимо сделать большим, чем минимальное T_{\min} , определяемое по критерию (2), то в качестве критерия оптимальности следует выбирать критерий минимума затрат электроэнергии

$$J_2 = q_{\min} = \int_0^{T_{\max}} i^2(\tau) d\tau, \quad (3)$$

где T_{\max} – максимальное время переходного процесса, которое допустимо по условиям работы данного механизма и которое не увеличивает общее время работы блюминга.

Если время T_{\max} фиксировано, то задача минимизации критерия (3) может рассматриваться как изопериметрическая вариационная задача с закрепленными концами траектории. При этом должно быть найдено оптимальное управление $u_{\text{опт}}(\tau)$, обеспечивающее выполнение граничных условий и минимизирующее функционал (3). Однако для реализации найденного $u_{\text{опт}}(\tau)$ наличие жестко фиксированного T_{\max} нежелательно, поскольку система при этом не будет инвариантной относительно текущего времени. Поэтому можно использовать комбинированный критерий, одновременно минимизирующий и длительность переходного процесса T , и потери q в виде:

$$J_3 = \int_0^T \left[k_1 + i^2(\tau) \right] d\tau. \quad (4)$$

В этом функционале время T не задано, а k_1 – весовой коэффициент, величина которого определяет вклад минимизируемой составляющей времени T по отношению к минимизируемой составляющей i^2 функционала (4). При $k_1 = 0$ получим функционал (3), а при $k_1 \rightarrow \infty$ – задачу оптимального быстрогодействия. Если величина k_1 подобрана заранее и остается постоянной для данного электропривода, то замкнутый регулятор в этом случае можно сделать инвариантным во времени. Отметим, что в силу инвариантности задачи вариационного исчисления закон оптимального управления, найденный по критерию (2) с учётом ограничения потерь q , будет совпадать с законом, найденным по критерию (3) при заданном T , но критерий (3) более предпочтителен, так как трудно установить предельно допустимые потери q_{\max} для каждого отдельного переходного процесса электропривода, в то время как значение T_{\max} обычно жестко задано по условиям технологического процесса.

Отметим, что при минимизации по рассмотренным критериям управляющее воздействие представляет собой многоинтервальную и разрывную функцию [3]. В то же время известно [4], что при введении в функционал качества слагаемого, пропорционального квадрату управляющего воздействия $u^2(\tau)$, оптимальное управление реализуется в виде непрерывной одноинтервальной функции времени, если не наступает ограничение по $u(\tau)$. Но даже если оно и наступает, то функция $u(\tau)$ в точках перехода на границу или с границы замкнутой области ограничений разрыва не претерпевает, что благоприятно сказывается на динамике электропривода.

С учетом сказанного введём в рассмотрение функционал

$$J = \int_0^T [k_2 u^2 + k_1 i^2(\tau)] d\tau, \quad (5)$$

где весовой коэффициент k_2 должен быть по возможности малым. Тогда при $k_2 = 0$ будет получен функционал (4), а если устремить к нулю и k_1 и k_2 , то в пределе будет минимизироваться критерий (3). Таким образом, в качестве обобщённого критерия может быть выбран критерий (5), который при соответствующем выборе весовых коэффициентов позволяет использовать его для всех механизмов блюминга.

Выводы. Проведен анализ критериев оптимальности для механизмов блюминга и даны рекомендации по их выбору. Предложен обобщённый критерий, позволяющий получать оптимальное управление в виде непрерывной одноинтервальной функции. В дальнейшем предполагается разработать математическую модель всего процесса прокатки с целью реализации наиболее экономичного и наиболее быстродействующего режима работы блюминга.

Список литературы: 1. Полухин П.И. и др. Прокатное производство / Учебник. – М: Металлургия, 1960. – 503 с. 2. Выдрин В.Н., Федосиенко А.С. Автоматизация прокатного производства / Учебник – М: Металлургия, 1984. – 472 с. 3. Рогачёв А.И. Минимизация потерь энергии в позиционном тиристорном электроприводе постоянного тока // Энергетика и электрификация. – Киев, 2000. – №10. – С.36-39. 4. Дудник А.В., Рогачёв А.И. и др. Квазиоптимальный энергосберегающий регулятор для позиционного электропривода // Вісник Східноукраїнського Національного університету ім. Володимира Даля. – Луганськ: СНУ, 2003. – №6. – С.55-61.

Поступила в редколлегию 22.03.08.